

Оригинальная статья / Original article УДК 550.347:550.344.6

DOI: http://dx.doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-2-194-208

## Азимутальная анизотропия Саяно-Байкальской складчатой области по приемным функциям далеких землетрясений

© М.М. Кобелева, М.А. Хритоваь, В.В. Мордвиновас, Е.А. Кобелева

а.b.dБайкальский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», г. Иркутск, Россия а.b.сИнститут земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

Резюме: Целью данного исследования являлось определение детальной скоростной структуры земных недр сейсмически активной Саяно-Байкальской складчатой области, в том числе выявление азимутов и глубин в окрестностях пунктов наблюдений, обладающих анизотропными свойствами. Исходными данными для исследования послужили многолетние наблюдения пяти широкополосных сейсмических станций в районе Саяно-Байкальской складчатой области. В основе предлагаемой методики выявления глубин и направлений земных недр, обладающих анизотропными свойствами, лежит метод продольной приемной функции. Из телесейсмических записей выделены приемные функции для всех возможных направлений относительно каждого пункта наблюдения. Выявлены азимутальные границы относительно наблюдающей станции, где приемные функции меняются существенным образом, что предполагает изменение скоростной структуры при переходе через эти условные границы. В пределах диапазонов азимутов ВАZ с однородными приемными функциями инверсией функций рассчитаны скоростные модели  $V_{\rm S}$ , учитывающие связь между глубиной зондирования среды h и соответствующим этой глубине расстоянием от сейсмостанции d. На основе одномерных скоростных разрезов для различных азимутов с учетом сейсмического сноса построены круговые модели  $V_S(h,BAZ,d)$ , визуализирующие скоростную структуру относительно всех пунктов наблюдения до глубин 70 и 270 км. В результате получен комплекс моделей, отражающих детальную глубинную скоростную структуру района Саяно-Байкальской складчатой области. Скорости сейсмических волн  $V_{\rm S}(h)$ определены в пределах земной коры со средним шагом по глубине 1 км, в пределах мантии - с шагом 5–10 км. Круговые модели  $V_S(h,BAZ,d)$  наглядно демонстрируют скоростную неоднородность в различных направлениях от пункта наблюдения и позволяют выявить анизотропность среды, проявляющуюся при таком представлении в наличии оси симметрии в круговых моделях, которая в среднем имеет ориентацию с северо-запада на юго-восток, но варьируется с глубиной.

**Ключевые слова:** сейсмическая анизотропия, Саяно-Байкальская складчатая область, метод функции приемника, глубинные скоростные разрезы, телесейсмические данные

**Благодарности:** Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 18-77-10027 «Эволюция и источники вулканизма зон транстенсии Японско-Байкальского геодинамического коридора») и Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания № 075-01304-20.

**Информация о статье:** Дата поступления 24 апреля 2020 г.; дата принятия к печати 29 мая 2020 г.; дата онлайн-размещения 30 июня 2020 г.

**Для цитирования:** Кобелев М.М., Хритова М.А., Мордвинова В.В., Кобелева Е.А. Азимутальная анизотропия Саяно-Байкальской складчатой области по приемным функциям далеких землетрясений. *Науки о Земле и недропользование*. 2020. Т. 43. № 2. С. 194–208. https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-2-194-208

## Azimuthal anisotropy of the Sayan-Baikal fold region by the receiving functions of distant earthquakes

© Mikhail M. Kobelev<sup>a</sup>, Mariya A. Khritova<sup>b</sup>, Valentina V. Mordvinova<sup>c</sup>, Elena A. Kobeleva<sup>d</sup> a.b.dBaikal Branch of the Federal Research Center "United Geophysical Survey RAS", Irkutsk, Russia a.b.cInstitute of the Earth's Crust, SB RAS, Irkutsk, Russia

**Abstract:** The purpose of the work is the determination of a detailed velocity structure of the earth's interior of the seismically active Sayan-Baikal fold region, including the identification of the azimuths and depths in the vicinity of the observation points with anisotropic properties. The source data for the study is the long-term observations by five broadband seismic stations in the Sayano-Baikal fold region. The proposed methodology for identifying the depths and directions of the earth's interior with anisotropic properties is based on the longitudinal receiving function



method. The receiving functions for all possible directions of each observation point have been selected from the tele-seismic records. The azimuthal boundaries are identified in relation to the observing station where the receiving functions change significantly, which means a change in the velocity structure when crossing these conditional boundaries. Within the azimuth ranges (BAZ) with homogeneous receiving functions, velocity models ( $V_S$ ) have been calculated by inverting the functions. The models take into account the relationship between the depth of medium sounding (h) and the corresponding distance from the seismic station (d). Based on the one-dimensional velocity sections for different azimuths, circular models  $V_S(h,BAZ,d)$  have been constructed with the account of the seismic drift. The models visualize the velocity structure in relation to all observation points at the depths up to 70 km and 270 km. As a result of the study, a set of models reflecting the detailed deep-seated velocity structure of the Sayano-Baikal folded region has been obtained. The velocities of the seismic waves  $V_S(h)$  have been determined within the earth's crust with an average depth step of 1 km, and within the mantle, with a step of 5–10 km. The circular models  $V_S(h,BAZ,d)$  clearly demonstrate the velocity heterogeneity in various directions from the observation point and allow one to identify the anisotropy of the medium. The latter is manifested as the presence of a symmetry axis in the circular models, which on average has a northwest-southeast orientation, but varies with the depth.

Keywords: seismic anisotropy, Sayano-Baikal fold region, receiver function method, deep velocity sections, teleseismic data

**Acknowledgements:** The study has been conducted with the support of the Russian Science Foundation (Project № 18-77-10027 "Evolution and sources of volcanism in the transtension zones of the Japan-Baikal geodynamic corridor") and the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the State Assignment № 075-01304-20.

Information about the article: Received April 24, 2020; accepted for publication May 29, 2020; available online June 30, 2020.

**For citation:** Kobelev MM, Khritova MA, Mordvinova VV, Kobeleva EA. Azimuthal anisotropy of the Sayan-Baikal fold region by the receiving functions of distant earthquakes. *Earth sciences and subsoil use.* 2020;43(2):194–208. (In Russ.) https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-2-194-208

#### Введение

До 70-х гг. прошлого века изучение глубинного строения Земли основывалось на веском допущении: исследования распространения сейсмических волн в реальной среде и построение скоростных моделей тормозились из-за предположения об идеальной упругости среды и скоростной изотропии Земли.

В настоящее время установлено, что верхняя мантия Земли обладает анизотропными свойствами. Один из традиционных методов исследования азимутальной анизотропии состоит в измерении азимутальных вариаций времен пробега продольных волн, а в конечном 
счете – в нахождении азимутальных скоростных неоднородностей. По данным 
поверхностных волн обнаруживается и 
азимутальная [1, 2], и вертикальная анизотропия скоростей сейсмических волн 
[3—8].

Анизотропия сейсмических волн в земной коре и верхней мантии обусловлена тонкослоистостью минеральных и породных образований, преимущественной ориентацией минеральных зерен в

породах, негидростатическим напряжением и распределением трещин в глубинной среде из-за воздействия тектонических сил во время различных геодинамических процессов. Поэтому тема исследования сейсмической анизотропии становится все более важной при решении фундаментальной задачи изучения структуры, состава и динамики отдельных частей Земли. В данной работе рассматривается сейсмически активная Саяно-Байкальская складчатая область.

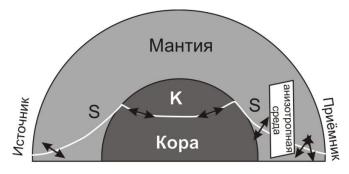
Метод выявления расщепления квазипоперечных сейсмических волн в фазе SKS. Все существующие способы изучения сейсмической анизотропии основаны на выявлении аномальных эффектов, возникающих при распространении волн, то есть на определении отличий волнового поля, регистрируемого на поверхности Земли, от изотропного случая.

Для исследования азимутальной сейсмической анизотропии широко применяется разработанный Л.П. Винником метод выявления расщепления квазипоперечных сейсмических волн в фазе SKS

[9, 10]. Метод основан на явлении расщепления прошедшей через ядро Земли поперечной волны на две квазипоперечные волны, распространяющиеся с различной скоростью (рис. 1). Для диагностики среды в районе приема используется волна далекого землетрясения, так как при прохождении через жидкое ядро продольная волна избавляется от влияния среды в районе источника, а на пути от ядра к району регистрации образуется пакет поперечных волн, который характеризует среду в районе исследования. Если поперечная волна на своем пути встречает анизотропный материал, она расщепляется как минимум на две различно поляризованные и распространяющиеся с заметно различающимися скоростями волны (см. рис. 1). Разница во времени прихода быстрой и медленной волны, которая может составить секунды, количественно характеризует степень анизотропии, зависящую от толщины и свойств анизотропных слоев в среде. Расщепление играет колоссальную роль на практике: только сам факт возникновения двух поперечных волн из одной является непреложным свидетельством наличия анизотропии хотя бы у одной из контактирующих сред [11]. Все другие признаки анизотропии (например, зависимость скорости распространения волны от азимута) могут возникать и изза латеральной неоднородности в изотропной среде. И тогда, чтобы различить, по какой причине наблюдаются азимутальные вариации скорости (из-за анизотропии или латеральной неоднородности), необходимо иметь достаточно полную систему наблюдения [9]. При использовании же сплиттинга (от англ. *split* – расщепление, разделение) иногда достаточно одной пары источник – приемник.

Район и предшествующие исследования. Для района Саяно-Байкальской складчатой области проведен ряд исследований сейсмической анизотропии. В рамках международного сотрудничества в 1990-е гг. и в начале 2000-х гг. на обширной территории также были проведены наиболее детальные, чем когдалибо ранее, сейсмические наблюдения. российско-американский PASSCAL 1992 и российско-монгольскофранцузский проект MOBAL 2003. Вдоль профилей PASSCAL и MOBAL исследована сейсмическая анизотропия методом SKS [12–14]. Метод SKS определяет наличие анизотропии в верхнемантийной толще с хорошим разрешением по латерали. Однако интерпретация величины запаздывания медленной волны затруднительна, поскольку только по SKS трудно судить об интервале глубин, в котором это запаздывание накапливается. Полезен комплексный подход, в котором необходимой составляющей является исследование распределения скорости сейсмических волн в регионе наблюдения не только как обычно, по глубине, но и по азимутам [15].

В результате найдены направления так называемых быстрых смещений и величины расщепления SKS-волн, которое на профиле MOBAL на территории Хангая превышает 3 с (рис. 2).



Puc. 1. Схема трассы «источник – приемник» волны SKS Fig. 1. Scheme of the "source – receiver route" of the SKS wave



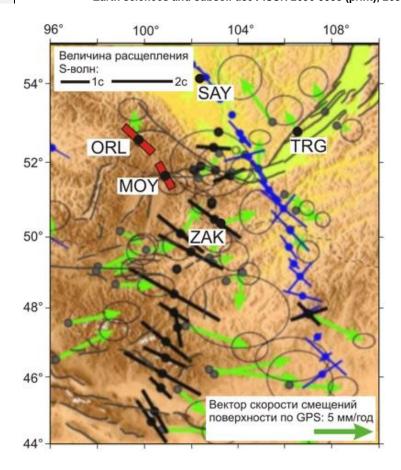


Рис. 2. Сводные данные по SKS-расщеплению и GPS-геодезии [14]:

зеленые стрелки — GPS-векторы и их эллипсоиды ошибок [16]; синие линии — быстрые смещения S-волн, измерения, опубликованные в работах [10, 17–20] по проекту PASSCAL\_1992; черные линии — SKS-данные, полученные в результате обработки наблюдений телесейсмического проекта MOBAL\_2003 (длина этих линий означает величину запаздывания волн) [14]; красные планки — определения по новым данным (проект РФФИ 12-05-01024), полученным по широкополосным записям стационарных сейсмических станций, установленных в пунктах ORL («Орлик», Восточные Саяны) и МОҮ («Монды», западное окончание Тункинского рифта Байкальской рифтовой системы)

Fig. 2. Summary data on SKS splitting and GPS geodesy [14]:

green arrows – GPS vectors and their error ellipsoids [16]; blue lines – fast displacements of S-waves, measurements published in [10, 17–20] by the project PASSCAL\_1992; black lines – SKS data obtained by processing the observations of the tele-seismic project MOBAL\_2003 (the length of the lines stands for the wave delay value) [14]; red bars – definitions according to new data (RFBR project 12-05-01024) obtained from the broadband records of the stationary seismic stations installed at the ORL ("Orlik", East Sayan) and MOY ("Mondy", western end of the Tunka rift, the Baikal rift system)

Сравнительно недавно (в рамках проекта РФФИ 12-05-01024 «Глубинное строение и геодинамическая обстановка южной части Саяно-Байкальской складчатой области») по записям наблюдений на станциях «Орлик» (ORL) и «Монды» (МОҮ) с помощью метода выявления поляризации волн SKS определены параметры анизотропии — направления быстрых смещений и величина расщепления

быстрой и медленной волны. Эти последние результаты хорошо вписываются в общую картину, согласуются по направлению быстрых смещений со смещениями вдоль профиля MOBAL\_2003, пересекающего Хангайское поднятие, но значительно меньше по расщеплению (запаздыванию медленной волны) (см. рис. 2).



Интерпретация анизотропии звала много споров (особенно по первому профилю PASSCAL 1992). В 1980-е и 1990-е гг. превалировала идея, что под Байкалом и на территории Монголии существует мощный единый астеносферный выступ, и во всех аномалиях предпочитали видеть эту причину. В настоящее время установлено, что глубинное строение не такое примитивное, как предполагалось ранее, и побеждает точка зрения об определяющей роли Индо-Евразийской коллизии в формировании скоростных неоднородностей, в том числе скоростной анизотропии. Именно в свете концепции Индо-Евразийской коллизии логично объясняется величина расщепления и направления быстрых волн, которые ориентированы перпендикулярно коллизионному направлению сжатия и, соответственно, параллельно возможному порождаемому коллизией современному глубинному течению. Логично, что на Хангае, где по различным данным кора и подкоровая мантия содержат расплавы, наблюдаются самые большие величины расщепления.

Следует отметить, что при всех достоинствах метод SKS определяет лишь сам факт наличия и интенсивности анизотропных свойств земных недр в том или ином пункте наблюдения. В результате анализа поляризации телесейсмических волн SKS не выявляются глубины, обладающие анизотропными свойствами. Если методом SKS подтверждается гипотеза о том, что переходная зона от Сибирской платформы к Центрально-Азиатскому складчатому поясу попадает в зону влияния Индо-Евразийской коллизии и ее недра формируются под ее влиянием, то появляется задача определения глубины наиболее интенсивных отрицательных скоростных аномалий. Интервалы пониженных скоростей сейсмических волн в этом случае с большей вероятностью, чем другие толщи, могут определять условия мантийного течения.

### Материалы и методы исследования

Исходными данными для исследования послужили многолетние наблюдения сейсмических станций «Орлик» (ORL), «Монды» (MOY), «Закаменск» (ZAK), «Тырган» (TRG) в районе Саяно-Байкальской складчатой области, а также станции «Саянск» (SAY), расположенной на юге Сибирской платформы (см. рис. 2; таблица). Сейсмические станции укомплектованы сейсмометрами Guralp CMG-6TD (T = 30 c) и Guralp CMG-3ESPCD (T = 120 c).

В основе предлагаемой методики выявления глубин и направлений земных недр, обладающих анизотропными свойствами, лежит метод функции приемника [21]. Из всего объема данных были отобраны записи сильных телесейсмических событий со всех возможных направлений с магнитудами более 5,5, эпицентральными расстояниями 30–90°, имеющие четко выраженные первые вступления и сравнительно быстро затухающие сигналы.

# Параметры сейсмических станций и данные, использовавшиеся в исследовании Seismic stations parameters and the data used in the study

Код	Наименование станции	Координаты (широта, долгота)	Тип прибора	Период наблюдения, годы	Количество сейсмограмм
ZAK	Закаменск	(50.382, 103.281)	Guralp CMG-3ESPCD	2012–2014	220
MOY	Монды	(51.668, 100.993)	Guralp CMG-3ESPCD	2012–2014	165
ORL	Орлик	(52.535, 99.808)	Guralp CMG-3ESPCD	2012–2014	176
TRG	Тырган	(52.76, 106.348)	Guralp CMG-3ESPCD	2012–2014	124
SAY	Саянск	(54.115, 102.174)	Guralp CMG-6TD	2014–2015	55



Метод приемных функций в основном применяется к записям колебаний в диапазоне частот от 0,01–0,5 Гц [21, 22]. Однако численное моделирование показало [23], что методу продольной приемной функции соответствует несколько большая полоса частот (0,01–0,9 Гц). Выделение функций приемника производилось с помощью программного обеспечения для анализа сейсмических сигналов в пакете программ Seismic Handler [24]. Эта часть программного обеспечения разработана согласно методу Л.П. Винника [21].

В Байкальский регион с необходимых для использования эпицентральных расстояний (30-90°) в основном приходят волны от юго-восточных тихоокеанских землетрясений. Но коллекция телесейсмических записей постоянно пополняется, так что к настоящему времени в районе каждой станций можно получить информацию о глубинном скоростном строении почти во всех направлениях вокруг точки наблюдения. С учетом среднего наклона сейсмических лучей при подходе к точке приема (25-30°) и максимально доступной методу продольной приемной функции глубины исследования (270 км) радиус основания конусоподобной области зондирования вокруг станции оценивается в 150 км. В то же время величина углов падения сейсмических лучей в слоистой среде под станцией (сейсмический снос) является важным параметром, учет которого позволяет уточнить представление о скоростной структуре в тектонически сложных регионах, не увеличивая затрат на проведение наблюдений. По выборкам записей землетрясений с разных азимутов относительно пункта наблюдения благодаря наклону сейсмических лучей (25-30°) появляется возможность выявить скоростные неоднородности в районе наблюдающей станции на удалении от нее, примерно равном половине зондируемой глубины. Подход, использующий сейсмический снос, разработан и применен нами на всех широкополосных сейсмостанциях юга Сибири, продолжительность непрерывных наблюдений которых составляет более двух лет.

Из телесейсмических записей выделены приемные функции для всех возможных направлений относительно каждого пункта наблюдения. Выявлены азимутальные границы относительно наблюдающей станции, где приемные функции меняются существенным образом, что предполагает изменение скоростной структуры при переходе через эти условные границы.

Функции приемника, полученные по единичному событию, далеки от идеала, что неизбежно из-за наличия сейсмического шума. Для уменьшения нерегулярного шума и подчеркивания элементов функций приемника, обусловленных наиболее значительными особенностями в строении исследуемого подстанционного объема, производилось суммирование трасс для всех событий в целевом диапазоне азимутов.

В пределах диапазонов азимутов BAZ с однородными приемными функциями инверсией функций рассчитаны скоростные модели  $V_S(h,BAZ,d)$ , учитывающие связь между глубиной зондирования среды h и соответствующим этой глубине расстоянием от сейсмостанции d.

Решение обратной задачи восстановления одномерных скоростных разрезов в окрестности регистрирующей станции выполнено по программе Г.Л. Косарева [25, 26], основанной на матричном методе вычисления теоретических сейсмограмм Томсона – Хаскелла [27]. Суть метода – в подборе компоненты теоретической функции приемника к наблюдаемой при допущении, что исследуемая структура представлена пачкой плоских однородных слоев, лежащих на однородном полупространстве. Определение одномерного скоростного разреза  $V_S(h)$  под сейсмической станцией представляет собой итерационный процесс, при котором различие между наблюдаемой и теоретической функциями минимизируется путем подбора параметров скоростного



разреза исходя из некоторого начального приближения  $V_0(h)$ . При заданных мощности каждого слоя и соотношениях скоростей  $V_P/V_S$  независимыми определяемыми параметрами модели являются скорости поперечных сейсмических волн S.

В качестве первого приближения в процедуре инверсии для всех станций и целевых диапазонов азимутов использована одна и та же ступенчатая функция скорости (близкая к параболической), рассчитанная усреднением набора одномерных скоростных моделей глубинного сейсмического зондирования для Саяно-Байкальской горной области [28]. Согласно данному зондированию, средняя скорость продольных волн P в земной коре задана равной 6,4 км/с, скорость поперечных волн S-3,7 км/с. Мантийная скорость поперечных волн непосредственно под корой принята равной 8 км/с,

отношение скоростей  $V_P/V_S = 1,8$ . Стандартная ошибка  $V_S(h)$  моделей – порядка 0,1 км/с.

На основе одномерных (для различных азимутов) и двумерных скоростных разрезов с учетом сейсмического сноса построены круговые модели, визуализирующие скоростную структуру, относительно пункта наблюдения до глубин 70 и 270 км (рис. 3, 4). На основании полученных моделей выполнена интерпретация.

### Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 3 представлена круговая модель до глубины 70 км относительно сейсмостанции «Орлик» (ORL). На модели видно, что сходство скоростной структуры проявляется в противоположных диапазонах азимутов, а осью симметрии является направление с северо-

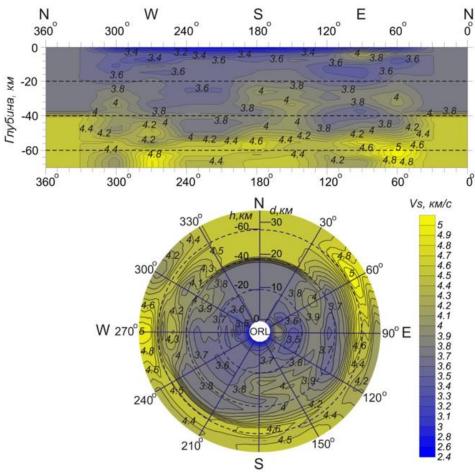


Рис. 3. Круговая модель до глубины 70 км на базе одномерных S-скоростных моделей для сейсмостанции «Орлик» (ORL)

Fig. 3. Circular model to a depth of 70 km based on the one-dimensional S-velocity models for the "Orlik" (ORL) seismic station



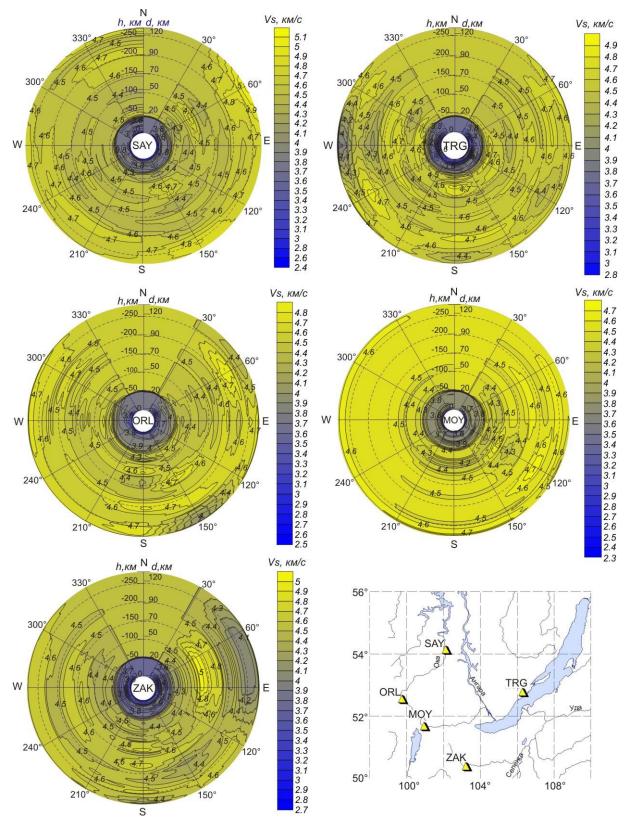


Рис. 4. Круговые модели до глубины 270 км на базе одномерных S-скоростных моделей для сейсмостанций «Саянск» (SAY), «Тырган» (TRG), «Орлик» (ORL), «Монды» (МОУ), «Закаменск» (ZAK)

Fig. 4. Circular models to a depth of 270 km based on the one-dimensional S-velocity models for the seismic stations "Sayansk" (SAY), "Tyrgan" (TRG), "Orlik" (ORL), "Mondy" (MOY), "Zakamensk" (ZAK)



запада на юго-восток (см. рис. 3). Это предварительный результат, поскольку еще не рассчитана скоростная модель для азимутального диапазона 330-30°, наиболее бедного записями сильных телесейсмических событий. Тем не менее, судя по скоростям во всех других азимутах, направление северо-запад - юго-восток является направлением быстрых скоростей как в коре, так и в подкоровой мантии. По-видимому, это реакция на сжатие примерно в направлении восток запад. В коре об этом свидетельствуют слои пониженной скорости, которые связывают с гранулитовыми слоями пониженной вязкости. Гранулитовые астенослои при сильных горизонтальных напряжениях способствуют автономному перемещению верхнекоровых частей микроплит [29].

На рис. 4 представлены круговые скоростные модели до глубины 270 км для сейсмостанций «Саянск» (SAY), «Тырган» (TRG), «Орлик» (ORL), «Монды» (МОY), «Закаменск» (ZAK). Построенные модели получились неоднозначными и отражают сложную глубинную подстанционную структуру исследуемого района.

На построенных моделях станций «Закаменск» (ZAK) и «Тырган» (TRG) прослеживается сходство скоростной структуры в противоположных диапазонах азимутов на глубинах до 100 км, ось симметрии выделяется в направлении с юга на север. Судя по скоростям во всех других азимутах, направление с юга на север является направлением быстрых скоростей в коре и в подкоровой мантии.

Круговая модель станции «Саянск» (SAY) выявляет сложную скоростную структуру без явной оси симметрии относительно станции, которая могла бы служить свидетельством мантийного современного или «вмороженного» течения. Однако в азимутальных диапазонах 210—270° и 90—150° можно проследить схожесть в распределении в коре и мантии высокоскоростных слоев, что может быть

реакцией глубин на сжатие примерно в направлении восток – запад.

На модели станции «Монды» (МОҮ) видны высокоскоростные области в мантии и подкоровой мантии в азимутальном диапазоне 90–150°, то есть можно выделить направление быстрых скоростей как северо-запад – юго-восток (см. рис. 4).

Это предварительные результаты, поскольку для северного азимутального диапазона (от 330 до 30°) накоплено еще недостаточно телесейсмических данных.

Круговые модели наглядно демонстрируют скоростную неоднородность в различных направлениях ОТ наблюдения и позволяют выявить анизотропность среды, проявляющуюся при таком представлении в наличии оси симметрии в круговой модели. На южной окраине Сибирского кратона по найденным до глубины 80 и 270 км зависимостям скорости поперечных сейсмических волн от азимута, глубины и расстояния от пункта наблюдения (круговым моделям выявлена  $V_{S}(h,BAZ,d)$ азимутальная сейсмическая анизотропия, которая в среднем имеет ориентацию с северо-запада на юго-восток, но варьируется с глубиной (см. рис. 3, 4).

Также для лучшего представления полученных результатов по разработанным круговым скоростным моделям в районах наблюдения определены интервалы глубин наиболее интенсивных положительных скоростных аномалий по сравнению со стандартным скоростным разрезом IASP91 [30]. То есть полученные результаты  $V_S(h,BAZ,d)$  сравнили с данными глобальной одномерной скоростной модели IASP91 посредством разности  $V_s(h, BAZ, d)$  -  $V_{IASP}(h)$ . На полученных моделях (рис. 5) высокоскоростные аномалии выделены синим цветом как наиболее плотные и, соответственно, относительно холодные области. Они с вероятностью, большей чем другие толщи, могут отвечать условиям анизотропии. Красным цветом показаны пониженные скорости относительно скоростного разреза IASP91.



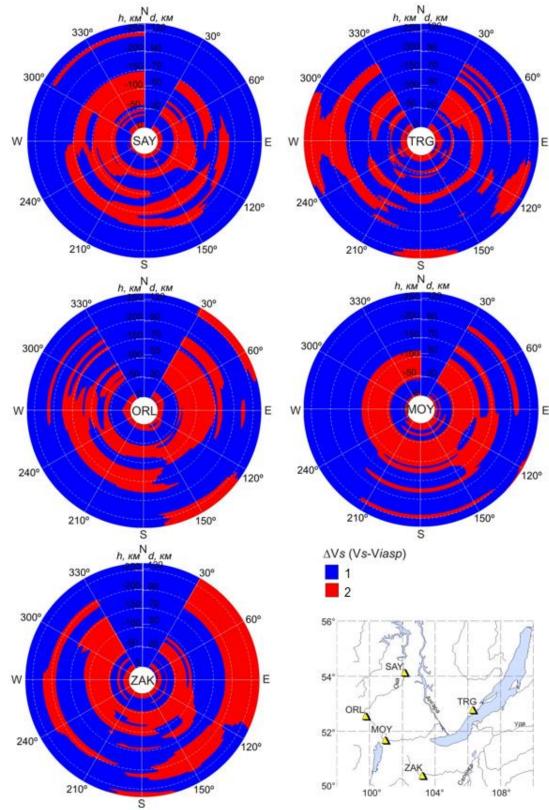


Рис. 5. Круговые модели скоростных аномалий до глубины 270 км для сейсмических станций «Саянск» (SAY), «Тырган» (TRG), «Орлик» (ORL), «Монды» (МОY), «Закаменск» (ZAK):

1 – повышенные скорости; 2 – пониженные скорости

Fig. 5. Circular models of the velocity anomalies to a depth of 270 km for the seismic stations "Sayansk" (SAY), "Tyrgan" (TRG), "Orlik" (ORL), "Mondy" (MOY), "Zakamensk" (ZAK):

1 – higher velocities; 2 – lower velocities



#### Заключение

По данным телесейсмических наблюдений пяти цифровых широкополосных сейсмических станций за несколько лет при помощи эффективного и экологически чистого метода продольной приемной функции [21, 25] более детально изучена скоростная структура Саяно-Байкальской складчатой области вплоть до глубины 270 км.

Скорости сейсмических волн  $V_S(h)$  определены в пределах земной коры со средним шагом по глубине 1 км, в пределах мантии – с шагом 5–10 км. Точность определения значений скорости волн  $\pm 0.1$  км/с. Одномерные разрезы «глубина – скорость» рассчитаны для различных направлений относительно пунктов наблюдений «Саянск» (SAY), «Тырган» (TRG), «Орлик» (ORL), «Монды» (MOY), «Закаменск» (ZAK) согласно обратным азимутам BAZ рассмотренных землетрясений.

На основании найденных значений  $V_S(h,BAZ)$  построен комплекс моделей, в том числе трехмерные круговые модели  $V_S(h,BAZ,d)$  — горизонтальная проекция

конусообразного объема среды, прозондированной с разных сторон сейсмическими лучами (радиус конуса модели определяется средним углом падения этих лучей).

Круговые модели  $V_S(h,BAZ,d)$  наглядно демонстрируют скоростную неоднородность в различных направлениях от пункта наблюдения и позволяют выявить анизотропность среды, проявляющуюся при таком представлении в наличии оси симметрии в круговых моделях, которая в среднем имеет ориентацию с северо-запада на юго-восток, но варьируется с глубиной.

На основе полученных результатов можно предположить: удаленное воздействие Индо-Азиатской коллизии на зону контакта южной окраины Сибирского кратона с Центрально-Азиатским подвижным поясом подтверждается наличием в этой зоне глубинной азимутальной анизотропии, проявляющейся в юго-восточном направлении относительно пунктов наблюдения повышенной скоростью сейсмических волн в верхней мантии.

#### Библиографический список

- 1. Forsyth D.W. The early structural evolution and anisotropy of the oceanic upper mantle // Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society. 1975. Vol. 43. Iss. 1. P. 103–162. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1975.tb00630.x
- 2. Trampert J., Woodhouse J.H. Global anisotropic phase velocity maps for fundamental mode surface waves between 40 and 150 s // Geophysical Journal International. 2003. Vol. 154. Iss. 1. P. 154–165. https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.2003.01952.x
- 3. Dziewonski A.M., Anderson D.L. Preliminary reference Earth model // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 1981. Vol. 25. Iss. 4. P. 297–356. https://doi.org/10.1016/0031-9201(81)90046-7
- 4. Mitchell B.J. On the inversion of Love- and Rayleigh-wave dispersion and implications for the Earth structure and anisotropy // Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society. 1984. Vol. 76. lss. 1. P. 233–241. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1984.tb05040.x
- 5. Montagner J.-P., Tanimoto T. Global upper mantle tomography of seismic velocities and anisotropies // Journal of Geophysical Research. 1991. Vol. 96. Iss. B12. P. 20337–20351. https://doi.org/10.1029/91JB01890

- 6. Villaseñor A., Ritzwoller M.H., Levshin A.L., Barmin M.P., Engdahl E.R., Spakman W., et al. Shear velocity structure of central Eurasia from inversion of surface wave velocities // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 2001. Vol. 123. Iss. 2-4. P. 169–184. https://doi.org/10.1016/S0031-9201(00)00208-9
- 7. Panning M., Romanowicz B. Inferences on flow at the base of the Earth's mantle based on seismic anisotropy // Science. 2004. Vol. 303. Iss. 5656. P. 351–353. https://doi.org/10.1126/science.1091524
- 8. Яновская Т.Б., Кожевников В.М. Анизотропия верхней мантии Азиатского континента по групповым скоростям волн Рэлея и Лява // Геология и геофизика. 2006. Т. 47. № 5. С. 622–629.
- 9. Винник Л.П., Косарев Г.Л., Макеева Л.И. Анизотропия по наблюдениям волн SKS и SKKS // Доклады Академии наук СССР. 1984. Т. 278. № 6. С. 1335–1339.
- 10. Vinnik L.P., Makeyeva L.I., Milev A., Usenko A.Yu. Global patterns of azimuthal anisotropy and deformations in the continental mantle // Geophysical Journal International. 1992. Vol. 111. Iss. 3. P. 433–447. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1992.tb02102.x



- 11. Гольдин С.В., Суворов В.Д., Макаров П.В., Стефанов Ю.П. Структура и напряженно-деформированное состояние литосферы Байкальской рифтовой зоны в модели гравитационной неустойчивости // Геология и геофизика. 2006. Т. 47. № 10. С. 1094–1105.
- 12. Gao S.S., Liu K.H., Davis P.M., Slack P.D., Zorin Y.A., Mordvinova V.V., et al. Evidence for small-scale mantle convection in the upper mantle beneath the Baikal rift zone // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2003. Vol. 108. Iss. B4. P. 2194. https://doi.org/10.1029/2002JB002039
- 13. Gao S.S., Liu K.H., Chen C. Significant crustal thinning beneath the Baikal rift zone: new constraints from receiver function analysis // Geophysical Research Letters. 2004. Vol. 31. Iss. 20. P. L20610. https://doi.org/10.1029/2004GL020813
- 14. Barruol G., Deschamps A., Deverchere J., Mordvinova V.V., Ulziibat M., Perrot J., et al. Upper mantle flow beneath and around the Hangay dome, Central Mongolia // Earth and Planetary Science Letters. 2008. Vol. 274. Iss. 1-2. P. 221–233. http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2008.07.027
- 15. Oreshin S., Vinnik L., Makeyeva L., Kosarev G., Kind R., Wentzel F. Combined analysis of SKS splitting and regional P traveltimes in Siberia // Geophysical Journal International. 2002. Vol. 151. Iss. 2. P. 393–402. https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.2002.01791.x
- 16. Calais E., Vergnolle M., San'kov V., Lukhnev A., Miroshnitchenko A., Amarjargal Sh., et al. GPS measurements of crustal deformation in the Baikal-Mongolia area (1994–2002): implications for current kinematics of Asia // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2003. Vol. 108. Iss. B10. P. 2501. https://doi.org/10.1029/2002JB002373
- 17. Silver P.G., Chan W.W. Shear-wave splitting and subcontinental mantle deformation // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 1991. Vol. 96. Iss. B10. P. 16429–16454. https://doi.org/10.1029/91JB00899
- 18. Gao S., Davis P.M., Liu H., Slack P.D., Zorin Yu.A., Mordvinova V.V., et al. Seismic anisotropy and mantle flow beneath the Baikal rift zone // Nature. 1994. Vol. 371. Iss. 6493. P. 149–151. https://doi.org/10.1038/371149a0
- 19. Gao S., Davis P.M., Liu H., Slack P.D., Rigor A.W., Zorin Y.A., et al. SKS splitting beneath continental rift zones // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 1997. Vol. 102. Iss. B10. P. 22781–22797. https://doi.org/10.1029/97jb01858
- 20. Dricker I.G., Roecker S.W. Lateral heterogeneity in the upper mantle beneath the Tibetan plateau and its surroundings from SS-S travel time

- residuals // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2002. Vol. 107. lss. B11. P. 2305. https://doi.org/10.1029/2001JB000797
- 21. Vinnik L.P. Detection of waves converted from P to SV in the mantle // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 1977. Vol. 15. Iss. 1. P. 39–45. https://doi.org/10.1016/0031-9201(77)90008-5
- 22. Kosarev G.L., Makeyeva L.I., Vinnik L.P. Inversion of teleseismic P-wave particle motions for crustal structure in Fennoscandia // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 1987. Vol. 47. P. 11–24. https://doi.org/10.1016/0031-9201(87)90063-X
- 23. Zorin Yu.A., Mordvinova V.V., Turutanov E.Kh., Belichenko V.G., Artemyev A.A., Kosarev G.L., et al. Low seismic velocity layers in the Earth's crust beneath Eastern Siberia (Russia) and Central Mongolia: receiver function data and their possible geological implication // Tectonophysics. 2002. Vol. 359. Iss. 3-4. P. 307–327.
- 24. Stammler K. SeismicHandler programmable multichannel data handler for interactive and automating processing of seismological analyses // Computers & Geosciences. 1993. Vol. 19. lss. 2. P. 135–140. https://doi.org/10.1016/0098-3004(93)90110-Q
- 25. Kosarev G.L., Petersen N.V., Vinnik L.P., Roecker S.W. Receiver functions for the Tien Shan analog broadband network: contrast in the evolution of structures across the Talasso-Fergana fault // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 1993. Vol. 98. Iss. B3. P. 4437–4448. https://doi.org/10.1029/92JB02651
- 26. Kind R., Kosarev G.L., Petersen N.V. Receiver functions at the stations of the German Regional Seismic Network (GRSN) // Geophysical Journal International. 1995. Vol. 121. Iss. 1. P. 191–202. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1995.tb03520.x
- 27. Haskell N.A. Crustal reflection of plane P and SV waves // Journal of Geophysical Research. 1962. Vol. 67. Iss. 12. P. 4751–4768. https://doi.org/10.1029/JZ067i012p04751
- 28. Крылов С.В., Мишенькин Б.П., Мишенькина З.Р., Петрик Г.В., Сергеев В.Н., Шелудько И.Ф. [и др.]. Детальные сейсмические исследования литосферы на Р- и S-волнах. Новосибирск: Наука, 1993. 199 с.
- 29. Лобковский Л.И. Геодинамика зон спрединга, субдукции и двухъярусная тектоника плит. М.: Наука, 1988. 251 с.
- 30. Kennett B.L.N., Engdahl E.R. Traveltimes for global earthquake location and phase identification // Geophysical Journal International. 1991. Vol. 105. Iss. 2. P. 429–465. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1991.tb06724.x

#### References

- 1. Forsyth DW. The early structural evolution and anisotropy of the oceanic upper mantle. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*. 1975;43(1):103–162. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1975.tb00630.x
- 2. Trampert J, Woodhouse JH. Global anisotropic phase velocity maps for fundamental mode surface waves between 40 and 150 s. *Geophysical Journal International*. 2003;154(1):154–165. https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.2003.01952.x



- 3. Dziewonski AM, Anderson DL. Preliminary reference Earth model. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 1981;25(4)297–356. https://doi.org/10.1016/0031-9201(81)90046-7
- 4. Mitchell BJ. On the inversion of Loveand Rayleigh-wave dispersion and implications for the Earth structure and anisotropy. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*. 1984;76(1):233–241. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1984.tb05040.x
- 5. Montagner J-P, Tanimoto T. Global upper mantle tomography of seismic velocities and anisotropies. *Journal of Geophysical Research*. 1991;96(B12):20337–20351. https://doi.org/10.1029/91JB01890
- 6. Villaseñor A, Ritzwoller MH, Levshin AL, Barmin MP, Engdahl ER, Spakman W, et al. Shear velocity structure of central Eurasia from inversion of surface wave velocities. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 2001;123(2-4):169–184. https://doi.org/10.1016/S0031-9201(00)00208-9
- 7. Panning M, Romanowicz B. Inferences on flow at the base of the Earth's mantle based on seismic anisotropy. *Science*. 2004;303(5656):351–353. https://doi.org/10.1126/science.1091524
- 8. Yanovskaya TB, Kozhevnikov VM. Upper mantle anisotropy beneath the Asian continent from group velocities of Rayleigh and Love waves. *Geologiya i geofizika*. 2006;47(5):622–629. (In Russ.)
- 9. Vinnik LP, Kosarev GL, Makeeva LI. Anisotropy by the observations of SKS and SKKS waves. *Doklady Akademii nauk SSSR*. 1984;278(6):1335–1339. (In Russ.)
- 10. Vinnik LP, Makeyeva LI, Milev A, Usenko AYu. Global patterns of azimuthal anisotropy and deformations in the continental mantle. *Geophysical Journal International*. 1992;111(3):433–447. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1992.tb02102.x
- 11. Gol'din SV, Suvorov VD, Makarov PV, Stefanov YuP. An instability gravity model for the structure and stress-stain state of lithosphere in the Baikal rift. *Geologiya i geofizika*. 2006;47(10):1094–1105. (In Russ.)
- 12. Gao SS, Liu KH, Davis PM, Slack PD, Zorin YA, Mordvinova VV, et al. Evidence for small-scale mantle convection in the upper mantle beneath the Baikal rift zone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth.* 2003;108(B4):2194. https://doi.org/10.1029/2002JB002039
- 13. Gao SS, Liu KH, Chen C. Significant crustal thinning beneath the Baikal rift zone: new constraints from receiver function analysis. *Geophysical Research Letters*. 2004;31(20):L20610. https://doi.org/10.1029/2004GL020813
- 14. Barruol G, Deschamps A, Deverchere J, Mordvinova VV, Ulziibat M, Perrot J, et al. Upper mantle flow beneath and around the Hangay dome, Central Mongolia. *Earth and Planetary Science Letters*. 2008;274(1-2):221–233. http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2008.07.027

- 15. Oreshin S, Vinnik L, Makeyeva L, Kosarev G, Kind R, Wentzel F. Combined analysis of SKS splitting and regional P traveltimes in Siberia. Geophysical Journal International. 2002;151(2):393–402. https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.2002.01791.x
- 16. Calais E, Vergnolle M, San'kov V, Lukhnev A, Miroshnitchenko A, Amarjargal Sh, et al. GPS measurements of crustal deformation in the Baikal-Mongolia area (1994–2002): implications for current kinematics of Asia. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth.* 2003;108(B10):2501. https://doi.org/10.1029/2002JB002373
- 17. Silver PG, Chan WW. Shear-wave splitting and subcontinental mantle deformation. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth.* 1991;96(B10):16429–16454. https://doi.org/10.1029/91JB00899
- 18. Gao S, Davis PM, Liu H, Slack PD, Zorin YuA, Mordvinova VV, et al. Seismic anisotropy and mantle flow beneath the Baikal rift zone. *Nature*. 1994;371(6493):149–151. https://doi.org/10.1038/371149a0
- 19. Gao S, Davis PM, Liu H, Slack PD, Rigor AW, Zorin YA, et al. SKS splitting beneath continental rift zones. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth.* 1997;102(B10):22781–22797. https://doi.org/10.1029/97jb01858
- 20. Dricker IG, Roecker SW. Lateral heterogeneity in the upper mantle beneath the Tibetan plateau and its surroundings from SS-S travel time residuals. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth.* 2002;107(B11):2305. https://doi.org/10.1029/2001JB000797
- 21. Vinnik LP. Detection of waves converted from P to SV in the mantle. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 1977;15(1):39–45. https://doi.org/10.1016/0031-9201(77)90008-5
- 22. Kosarev GL, Makeyeva LI, Vinnik LP. Inversion of teleseismic P-wave particle motions for crustal structure in Fennoscandia. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 1987;47:11–24. https://doi.org/10.1016/0031-9201(87)90063-X
- 23. Zorin YuA, Mordvinova VV, Turutanov EKh, Belichenko VG, Artemyev AA, Kosarev GL, et al. Low seismic velocity layers in the Earth's crust beneath Eastern Siberia (Russia) and Central Mongolia: receiver function data and their possible geological implication. *Tectonophysics*. 2002. 2002;359(3-4):307–327. https://doi.org/10.1016/S0040-1951(02)00531-0
- 24. Stammler K. SeismicHandler programmable multichannel data handler for interactive and automating processing of seismological analyses. *Computers & Geosciences*. 1993;19(2):135–140. https://doi.org/10.1016/0098-3004(93)90110-Q
- 25. Kosarev GL, Petersen NV, Vinnik LP, Roecker SW. Receiver functions for the Tien Shan analog broadband network: contrast in the evolution of structures across the Talasso-Fergana fault. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth.*



1993;98(B3):4437-4448. https://doi.org/10.1029/ 92JB02651

26. Kind R, Kosarev GL, Petersen NV. Receiver functions at the stations of the German Regional Seismic Network (GRSN). Geophysical Journal International. 1995;121(1):191–202. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1995.tb03520.x

27. Haskell NA. Crustal reflection of plane P and SV waves. Journal of Geophysical Research. 1962;67(12):4751–4768. https://doi.org/10.1029/ JZ067i012p04751

28. Krylov SV, Mishen'kin BP, Mishen'kina ZR, Petrik GV, Sergeev VN, Shelud'ko IF, et al. Detailed seismic studies of the lithosphere at the P and S waves. Novosibirsk: Nauka; 1993. 199 p. (In Russ.)

29. Lobkovskii LI. Geodynamics of spreading and subduction zones, and bunk plate tectonics. Moscow: Nauka; 1988. 251 p. (In Russ.)

30. Kennett BLN, Engdahl ER. Traveltimes for global earthquake location and phase identification. Geophysical Journal International. 1991;105(2):429-465. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1991.tb06724.x

#### Критерии авторства / Authorship criteria

Кобелев М.М., Хритова М.А., Мордвинова В.В., Кобелева Е.А. написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Mikhail M. Kobelev, Mariya A. Khritova, Valentina V. Mordvinova, Elena A. Kobeleva are the authors of the article, hold equal copyright and bear equal responsibility for plagiarism.

#### Конфликт интересов / Responsibility for plagiarism

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи. All authors have read and approved the final version of this manuscript.

#### Сведения об авторах / Information about the authors



#### Кобелев Михаил Михайлович,

начальник отдела сейсмических наблюдений, Байкальский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия, ведущий инженер лаборатории комплексной геофизики, Институт земной коры СО РАН, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия,

e-mail: kobelevmm@gmail.com

#### Mikhail M. Kobelev,

Head of the Seismic Observation Department, Baikal Branch of the Federal Research Center "United Geophysical Survey RAS". 128 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia, Leading Engineer, Laboratory of Complex Geophysics. Institute of the Earth's Crust, SB RAS, 128 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia, e-mail: kobelevmm@gmail.com



#### Хритова Мария Анатольевна,

кандидат технических наук, начальник сектора автоматизации сбора и обработки сейсмологической информации, Байкальский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия, научный сотрудник лаборатории комплексной геофизики. Институт земной коры СО РАН. 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия, e-mail: hritova@crust.irk.ru



#### Mariya A. Khritova,

Cand. Sci. (Eng.), Head of the Sector of Automation of the Collecting and Processing of Seismological Information, Baikal Branch of the Federal Research Center "United Geophysical Survey RAS", 128 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia, Researcher, Laboratory of Complex Geophysics, Institute of the Earth's Crust, SB RAS, 128 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia, e-mail: hritova@crust.irk.ru



#### Мордвинова Валентина Владимировна,

доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории комплексной геофизики, Институт земной коры СО РАН, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия,

e-mail: mordv@crust.irk.ru Valentina V. Mordvinova,

Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Lead Researcher, Laboratory of Complex Geophysics, Institute of the Earth's Crust, SB RAS, 128 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia,

e-mail: mordv@crust.irk.ru



#### Кобелева Елена Анатольевна.

кандидат физико-математических наук, директор, Байкальский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия, e-mail: ekobeleva@crust.irk.ru

Elena A. Kobeleva, Cand. Sci. (Phys. & Math.), Director.

Baikal Branch of the Federal Research Center "United Geophysical Survey RAS", 128 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia,

e-mail: ekobeleva@crust.irk.ru